Vol.11, No.4, Winter 2023, pp.149-171 ISSN (Print):2322-1682 ISSN (Online):2383-3076

Journal of Geography and Environmental Hazards

RESEARCH ARTICLE DOI:10.22067/geoeh.2023.79331.1291 Open access

Land Subsidence Risk Zoning in Sarab Plain, using MARCOS and CODAS Multi-Criteria Analysis Algorithms

Sayyad Asghari Saraskanrood[a*], Elnaz Piroozi[b], Leila Aghayary[c]

[a] *Professor in Geomorphology, Faculty of Social Sciences, University of Mohaghegh Ardabili, Iran*
[b] *PhD in Geomorphology, Faculty of Social Sciences, University of Mohaghegh Ardabili, Iran*
[c] *PhD Candidate in Geomorphology, Faculty of Social Sciences, University of Mohaghegh Ardabili, Iran*

Received: 24 October 2022 ***Revised: 21 January 2023*** ***Accepted: 7 February 2023***

Abstract

Among the risks facing the plains in Iran is subsidence, which causes many problems in agricultural lands, roads, power, and energy transmission lines. In recent years, Sarab plain has faced a sharp drop in the level of underground water, which has caused this area to be exposed to the risk of subsidence. Therefore, the purpose of this research is to investigate and analyze the most important factors involved in creating the risk of subsidence in Sarab plain and to identify the susceptible surfaces that are likely to be involved in subsidence in the future, using the multi-criteria MARCOS and CODAS algorithms. According to the results of subsidence risk zoning, water depth, land use, and slope, respectively, with weight coefficients of 0.194, 0.171, and 0.159, are the most important factors involved in creating the risk of subsidence in the studied area. The output of the MARCOS method showed that, respectively, 167.50 and 276.09 square kilometers of the area of Sarab Plain, and results of applying the CODAS method, showed that 187.13 and 279.03 square kilometers of the area are in the high-risk and critical category. In addition, the map extracted from the MARCOS and CODAS algorithms with the depth of the water level of the wells, respectively, have correlation coefficient values of 0.77 and 0.81. A correlation can be seen between the output of both methods with the water level map. It seems that the results of this study can be of great help to organizational managers and land and soil resource planners for protecting and managing water resources and natural hazards and preventing land degradation.

Keywords: Subsidence, Zoning, Sarab Plain, Multi-Criteria Analysis Algorithms

*. Corresponding author: Sayyad Asghari Saraskanrood E-mail: s.asghari@uma.ac.ir Tel: + 989104020251

How to cite this Article: Asghari Saraskanrood, S., Piroozi, E., & Aghayary, L. (2023). Land Subsidence Risk Zoning in Sarab Plain, using MARCOS and CODAS Multi-Criteria Analysis Algorithms. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, *11*(4), 149-171.
DOI:10.22067/geoeh.2023.79331.1291

Geography and Environmental Hazards
Volume 11, Issue 4 - Number 44, Winter 2023
https://geoeh.um.ac.ir
https://doi.org/10.22067/geoeh.2023.79331.1291

جغرافیا و مخاطرات محیطی، سال یازدهم، شمارهٔ چهل و چهارم، زمستان ۱٤۰۱، صص ۱۷۱-۱٤۹

مقاله پژوهشی

ویژه‌نامه (چالش جهانی فرونشست زمین: مدیریت بحران یا بحران مدیریت)

پهنه‌بندی گسترهٔ خطر فرونشست زمین در دشت سراب، با بهره‌گیری از الگوریتم‌های تحلیل چند معیاره MARCOS و CODAS

صیاد اصغری سراسکانرود[1]– استاد ژئومورفولوژی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.
الناز پیروزی– دکتری ژئومورفولوژی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.
لیلا آقایاری– دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

تاریخ دریافت: ۱٤۰۰/۸/۲ **تاریخ بازنگری:** ۱٤۰۰/۱۱/۱ **تاریخ تصویب:** ۱٤۰۰/۱۱/۱۸

چکیده

یکی از مخاطرات پیش روی دشت‌های کشور، مخاطره فرونشست است که سبب بروز مشکلات و معضلات فراوان در زمین‌های کشاورزی، جاده‌ها، خطوط انتقال نیرو و انرژی می‌گردد. دشت سراب نیز در طی سال‌های اخیر با افت شدید سطح آب زیرزمینی مواجه بوده که این عامل سبب گردیده تا این منطقه در معرض وقوع مخاطره فرونشست قرار گیرد. هدف این پژوهش بررسی و تحلیل مهم‌ترین عوامل دخیل در ایجاد خطر فرونشست دشت سراب و مشخص کردن سطوح مستعد که احتمالاً در آینده درگیر فرونشست خواهند شد، با بهره‌گیری از الگوریتم‌های چند معیاره MARCOS و CODAS است. با توجه به نتایج حاصل از پهنه‌بندی خطر فرونشست؛ معیارهای عمق آب، کاربری اراضی و شیب؛ به ترتیب با ضریب وزنی ۰/۱۹٤، ۰/۱۷۱ و ۰/۱۵۹، مهم‌ترین عوامل دخیل در ایجاد خطر فرونشست محدوده مطالعاتی می‌باشند. با توجه به خروجی حاصل از روش MARCOS، به ترتیب؛ ۱٦۷/۵۰ و ۲۷٦/۰۹ کیلومترمربع از مساحت دشت سراب و طبق نتایج حاصل از به‌کارگیری روش CODAS، ۱۸۷/۱۳ و ۲۷۹/۰۳ کیلومترمربع

---

۱ نویسنده مسئول: ۰۹۱۰٤۰۲۰۲۵۱ Email: s.asghari@uma.ac.i

نحوه ارجاع به این مقاله:

اصغری سراسکانرود، صیاد؛ پیروزی، الناز؛ آقایاری، لیلا؛ ۱٤۰۱. پهنه‌بندی گسترهٔ خطر فرونشست زمین در دشت سراب، با بهره‌گیری از الگوریتم‌های تحلیل چند معیارهMARCOS و CODAS. *جغرافیا و مخاطرات محیطی*. ۱۱(٤). صص ۱۷۱-۱٤۹
https://doi.org/10.22067/geoeh.2023.79331.1291

از مساحت محدوده، در طبقهٔ پرخطر و بحرانی قرار دارد. به‌علاوه، نقشه مستخرج از الگوریتم MARCOS و CODAS با عمق سطح آب چاه‌ها به ترتیب؛ دارای مقدار ضریب همبستگی ۰/۷۷ و ۰/۸۱ می‌باشند و بین خروجی هر دو روش با نقشه سطح آب همبستگی دیده می‌شود. به نظر می‌رسد، نتایج حاصل از مطالعه حاضر، می‌تواند به مدیران سازمانی و برنامه‌ریزان منابع اراضی و خاک، در زمینهٔ حفاظت و مدیریت منابع آبی و مخاطرات طبیعی و جلوگیری از تخریب سرزمین کمک شایانی نماید.
کلیدواژه‌ها: فرونشست، پهنه‌بندی، دشت سراب، الگوریتم‌های تحلیل چند معیاره.

۱- مقدمه

فرونشست زمین به‌عنوان پدیده‌ای مورفولوژیک، نوعی از تغییر شکل سطح زمین است که با دگرشکلی عمودی و یا حرکت رو به پایین سطح زمین و همچنین نشست تدریجی یا دفعی مواد سطحی همراه است (شریفی‌کیا و همکاران، ۱۳۹٤). فرونشست به علل گوناگونی ازجمله عوامل طبیعی مانند زلزله، آتشفشان، فعالیت‌های گسلی، فرونشست ناشی از بالا آمدن سطح دریا، انحلال در سنگ، اکسایش، فشردگی رسوبات آلی، توسعه چاله در زمین‌های کارستی یا ناشی از فعالیت‌های انسانی، شامل برداشت بی‌رویه سیالات از زمین نظیر آب، نفت و گاز روی می‌دهد (شفیعی و همکاران، ۱۳۹۹). هرچند محوریت رویداد آن متوجه دو عامل اصلی استخراج آب زیرزمینی و کارستی شدن سنگ‌های انحلال‌پذیر است (شریفی‌کیا،۱۳۹۱). فرونشست سبب تخریب کانال‌های آبیاری، شکست خطوط لوله‌های آب و نفت، خطوط انتقال نیرو و تخریب سازه‌ها و تشدید فرایند زمین‌لغزه و سیلاب‌ها می‌شود و در صورت عدم شناخت این پدیده سبب آسیب جدی به زیرساخت‌های اقتصادی می‌گردد (گامبولاتی و همکاران[1]، ۲۰۱۸). فرونشست زمین در ایران سابقه‌ای طولانی دارد، در گذشته تنها برخی از استان‌ها ازجمله کرمان و یزد با این مسئله مواجه بودند ولی هم اکنون بهره‌برداری بیش‌ازحد از آب‌های زیرزمینی سبب شده تا بسیاری از دشت‌های ایران با مسئله فرونشست مواجه باشند. بر اساس آمار اعلام شده در کشور ایران، اثرات سوء ناشی از رخداد فرونشست رقم پایینی نیست و به‌سرعت در حال ایجاد و گسترش در دشت‌های مختلف سراسر کشور است که عدم مدیریت و کنترل به‌موقع عوامل آن می‌تواند خسارات جانی و مالی جبران‌ناپذیری برجای بگذارد (منتظریون و اصلانی، ۱۳۹۸).

باید توجه داشت که از یک‌سو، یکی از مهم‌ترین راهکارهای کنترل فرونشست در مناطق بر اساس تجارب جهانی، روش‌های غیر سازه‌ای کاهش‌دهنده و تطبیق‌دهنده است (آبیدین و همکاران[2]، ۲۰۱۵) و از سوی دیگر، اندازه‌گیری رخداد فرونشست در مقیاس وسیع به دلیل نرخ کُند آن چالش‌برانگیز است و نیاز به فنّاوری‌های پیشرفته دارد. امروزه سیستم اطلاعات جغرافیایی، ابزاری مؤثر برای سیستم‌های پشتیبانی تصمیم‌گیری تعاملی برای عملیات

1 Gambolati et al
2 Abidin et al

مدیریت ریسک هستند (بوخیر و همکاران، ۲۰۰۶) و همچنین، برای کشف طیف وسیعی از گزینه‌ها از نظر درگیری‌های عینی و معیارهای چندگانه، از روش MCDM استفاده می‌شود (آهر و همکاران[1]، ۲۰۱۳). در این روش‌های تصمیم‌گیری برای بهینه‌سازی مدل، از معیارهای مختلفی برای افزایش صحت تصمیمات استفاده می‌شود (جورجیو و همکاران[2]، ۲۰۱۵؛ عرب عامری و همکاران[3]، ۲۰۱۸). لذا می‌توان گفت، استفاده از سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی و روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره، با یک رویکرد تلفیقی، می‌تواند باعث تسریع در روند برنامه‌ریزی در تشخیص موارد بحرانی و اضطراری شده و منجر به صدور نتایج مناسبی گردد.

با توجه به اهمیت موضوع در سال‌های اخیر، مطالعات مختلفی در زمینه فرونشست صورت گرفته است. کیانی و همکاران (۱۳۹۷)، اقدام به بررسی ارتباط فرونشست زمین و افت سطح آب‌های زیرزمینی در شهرستان کرج با استفاده از روش تلفیق وزنی در محیط GIS کرده و نتیجه کارشان نشان داده که بین وضعیت توپوگرافی، ضخامت سازند و برداشت آب ارتباط تنگاتنگی وجود دارد و بیشترین میزان فرونشست در مناطق با برداشت زیاد، آبرفت‌های ضخیم و مناطق پست دشت مشاهده می‌شود. منتظریون و اصلانی (۱۳۹۸)، با به‌کارگیری سیستم اطلاعات جغرافیایی به ارزیابی خطر فرونشست زمین در پهنه استان‌های تهران و البرز پرداختند. یافته‌های پژوهش نشان داد، مناطق وسیعی در استان تهران ازجمله غرب و جنوب غربی و همچنین دشت ورامین، شهریار، کرج، نظرآباد و ساوجبلاغ در استان البرز ازجمله مناطق مستعد وقوع فرونشست هستند و آنچه باعث ایجاد خطر فرونشست می‌گردد، عدم کنترل و مدیریت مناسب منابع و ذخایر آب‌های زیرزمینی در سطح استان است. ابراهیمی و همکاران (۱۳۹۹)، به پایش میزان فرونشست محدوده شهری دشت پاکدشت با روش تداخل‌سنجی پرداختند. نتایج حاصل از مطالعه، در طی بازه زمانی یک‌ساله بین ۱۵ تا ۸۵ میلی‌متر فرونشست را نشان می‌دهد و مهم‌ترین و مؤثرترین عامل در فرونشست را هم‌افت سطح آب‌های زیرزمینی عنوان کرده‌اند. فرزین کیا و همکاران (۱۴۰۰)، پهنه‌بندی خطر فرونشست زمین در دشت جوین را با استفاده از مدل تحلیل شبکه‌ای_ فازی موردمطالعه قراردادند. با توجه به نتایج مطالعه حدود ۵۶ درصد از مساحت محدود و شامل قسمت مرکزی دشت دارای احتمال خطر زیاد تا خیلی زیاد است و تراکم بالای چاه‌های عمیق و نیمه عمیق و افت بالای آب‌های زیرزمینی به دلیل برداشت بی‌رویه، به‌عنوان دلیل اصلی استعداد بالای فرونشست محدوده مشخص شد. روستایی و همکاران (۱۴۰۱)، مناطق مستعد ریسک فرونشست زمین در اثر افت سطح آب زیرزمینی با استفاده از روشFUZZY-AHP، در دشت شبستر–صوفیان، موردبررسی قرار دادند. طبق نتایج مطالعه، مناطق جنوبی و غربی دشت شبستر– صوفیان مستعد فرونشست زیاد تا خیلی زیاد بوده است و این مناطق منطبق بر کاربری‌های کشاورزی و مراتع می‌باشند. اصغری سراسکانرود و همکاران (۱۴۰۱)، به برآورد و

1 Aher et al
2 Georgiou et al
3 Arab Ameri et al

پهنه‌بندی خطر فرونشست زمین در دشت مرکزی استان البرز با بهره‌گیری از تکنیک تداخل‌سنجی راداری و الگوریتم تحلیل چند معیاره ARAS پرداختند و نتایج مطالعه نشان داد، فرونشست در محدوده بین صفر تا ۳۰۰ میلی‌متر بوده و به ترتیب ۱۳۵/۵۵ و ۱۹۲/۲۸ کیلومترمربع از محدوده دارای احتمال خطر بسیار زیاد و زیاد است. به‌علاوه مهم‌ترین عامل اصلی دخیل در افزایش پتانسیل فرونشست محدوده، بهره‌برداری بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی و افت سطح آب است. گامبولاتی و همکاران[1] (۲۰۱۸)، در پژوهشی به مطالعه تأثیر فعالیت‌های انسانی بر میزان فرونشست زمین در مناطق مسکونی پرداختند و طبق بررسی‌های انجام شده برداشت بی‌رویه منابع زیرزمینی و تجمع سازه‌ها را مهم‌ترین علت فرونشست در مناطق مسکونی بیان کردند. مین و همکاران[2] (۲۰۱۹)، در پژوهشی به بررسی فرونشست در هانوی ویتنام، از طریق تکنیک تداخل‌سنجی راداری پرداختند و با توجه به نتایج حاصله، افت سطح آب زیرزمینی مهم‌ترین عامل مؤثر در فرونشست محدوده شناخته شده است. هوانگ و همکاران[3] (۲۰۲۰)، به بررسی فرونشست شهر دژو با روش SBAS پرداختند. بررسی‌ها طی بازه زمانی دو ساله نشان می‌دهد که مرکز فرونشست بخش‌های شرقی و شمال‌شرقی با میزان فرونشست ۴۵ میلی‌متری است و این نشست هم رابطه مستقیمی با افت سطح آب‌های زیرزمینی دارد. رنجبر و همکاران[4] (۲۰۲۱)، به بررسی حساسیت فرونشست زمین، در شهرستان شهریار با استفاده از تکنیک تداخل سنجی و الگوریتم‌های یادگیری ماشین‌بردار پرداختند و به این نتیجه رسیدند، در سال‌های اخیر به دلیل افزایش جمعیت و برداشت بیشتر از آب‌های زیرزمینی؛ نرخ فرونشست افزایش یافته است. گرج و همکاران[5] (۲۰۲۲)، در پژوهشی، با استفاده از تکنیک InSAR به مطالعه خطر فرونشست زمین در شهر دهلی هند، در طی سال‌های ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۰، پرداختند. با توجه به نتایج حاصل از این پژوهش، به‌طور تقریبی، ۱۰۰ کیلومترمربع از مساحت منطقه در معرض خطر فرونشست زمین قرار دارد و گسترش و برداشت بیش‌ازحد آب‌های زیرزمینی، به‌عنوان علت اصلی فرونشست زمین، در منطقه است.

دشت سراب، از دشت‌های حاصلخیز استان آذربایجان شرقی است که اقتصاد جوامع ساکن در آن به کشاورزی و دامداری وابسته است. در این دشت به دلیل شرایط خشک حاکم بر منطقه و بارش دریافتی کم، کشاورزان علاوه بر آب‌های سطحی، از آب‌های زیرزمینی به‌عنوان مکمل برای آبیاری مزارع و باغات استفاده می‌کنند (اسفندیاری و همکاران، ۱۳۹۷). لذا، در سال‌های اخیر این دشت با مشکل برداشت بی‌رویه آب و درنتیجه فقر سفره‌های آب زیرزمینی و فرونشست زمین روبه‌رو شده است. به‌طوری‌که کمیته مخاطرات زمینی سازمان نقشه‌برداری کشور نیز، در راستای ایفای نقش خود در زمینه پایش تغییرات سطحی پوسته زمین در کشور، طی نامه‌ای نرخ و گستره فرونشست

1 Gambolati et al
2 Minh et al
3 Huang et al
4 Ranjgar et al
5 Garg et al

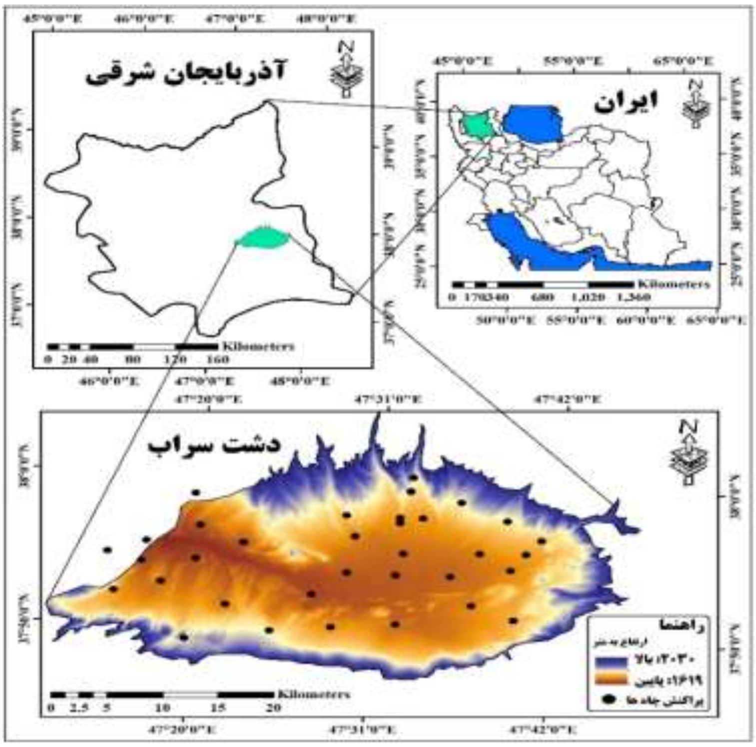
این منطقه را به وزارت جهاد کشاورزی، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی و فرمانداری شهرستان سراب اعلان نموده و نسبت به بروز مخاطرات این پدیده هشدار داده است (سایت سازمان نقشه‌برداری، ۱۴۰۰). با توجه به اهمیت موضـوع، مطالعاتی نیز در راسـتای بررسی مسئله فرونشست در محدوده دشت سراب انجام شده است. به‌عنوان‌مثال؛ ناموری و صـدری‌کیا (۱۳۹۹)، با اسـتفاده از تصـاویر راداری Sentinel و به کمک تکنیک تداخل‌سنجی راداری نرخ فرونشـست دشت سراب را ما بین سال‌های ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۰ مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان داد در دشت سراب فرونشـست زمین با حداکثر نرخ سالانه حدود ٤ سانتیمتر وجود دارد و فرونشست در بخش‌های جنوبی شهر سراب نسـبتاً قابل‌توجه اسـت. صـدری‌کیا (۱۴۰۱)، با استفاده از روش تحلیل سری زمانی تداخل‌سنجی راداری، در فاصله سال‌های ۱۳۸۳ تا ۱۳۹۸، به پایش فرونشست زمین در دشت سراب، پرداخته است. طبق نتایج حاصل از این پژوهش در دشـت سـراب بیشـینه فرونشـستی حدود ۳۰/۵- میلی‌متر در سال در راستای خط دید ماهواره و حدود ٤٤/٨٥- میلی‌متر در سـال در راستای قائم دیده می‌شود و در مناطق دارای فرونشست زیاد، کاهش سطح ایستابی وجود داشته و رابطه آماری بین سـطح ایسـتابی و جابه‌جایی‌های سـطح زمین معنی‌دار اسـت و رابطه مستقیم بین دو متغیر وجود دارد. همان‌طور که بررسـی پیشـینه پژوهشی نشان می‌دهد، از یک‌سو مطالعات انجام شده در محدوده دشت سراب، صـرفاً با هدف برآورد نرخ فرونشـست بر پایه بهره‌گیری از تکنیک تداخل‌سنجی راداری استوار بوده است و تاکنون مطالعه‌ای به‌منظور پهنه‌بندی سـطح دشت سراب از لحاظ پتانسیل رخداد فرونشست انجام نشده است. از سوی دیگر با توجه به اینکه فرونشـست، ازجمله مخاطراتی است که دارای طیف وسیعی از گزینه‌ها از نظر درگیری‌های عینی و معیارهای چندگانه، هسـتند، یکی از روش‌های کاربردی و موردتوجه در طی سـال‌های اخیر، اسـتفاده از روش‌های تصـمیم‌گیری چند معیاره اسـت؛ لذا هدف این مطالعه، شـناخت و تحلیل عوامل مؤثر بر فرونشست دشت سراب و مشـخص کردن سـطوح مسـتعد فرونشست با ارائه نقشه پهنه‌بندی خطر فرونشست زمین با استفاده از الگوریتم‌های تحلیل چند معیاره MARCOS و CODAS و سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه موردمطالعه

دشـت سـراب با مسـاحت ۹۱۸ /٤۰ کیلومترمربع، بین مدارهای ۳۷ درجه و ٤۷ دقیقه تا ۳۸ درجه ۳ دقیقه و ۲۱ ثانیهٔ شـمالی و نصـف‌النهارهای ٤۷ درجه و ۱۰ دقیقه تا ٤۷ درجه و ۵۰ دقیقه شرقی قرار گرفته است (شکل ۱). این دشـت، در میان توده‌های عظیم آتشفشانی سبلان و رشته‌کوه‌های بزقوش واقع شده است و پیوستگی کوهستان سبلان و بزقوش، در شرق و شمال، این دشت را به‌صورت چالهٔ بسته درآورده که فقط از گوشه شمال‌غربی باز است. دشت سـراب شـکل کشـیده‌ای دارد و کشـیدگی آن، در جهت شـرقی – غربی می‌باشـد. دشت سراب در محور رودخانه آجی‌چای و در امتداد شرقی–غربی واقع شده است و سفرهٔ آب‌های آزاد این دشت بیشتر از جریان آبی کوهستان‌های

سبلان و بزقوش، تأمین می‌شود. منابع آب سطحی دشت را بیوک‌چای، تاجیارچای، رازلیق‌چای، وانق‌چای تشکیل می‌دهند که از ارتفاعات اطراف سرچشمه می‌گیرند و بعد از روستای اندرآب به‌هم‌پیوسته و با نام آجی‌چای از شرق به غرب جریان یافته و درنهایت به دریاچه ارومیه می‌ریزند (تلسچی امیرخیزی و همکاران، ۱۳۹۸). این دشت شش درهٔ آبرفتی دارد که رسوبات آن‌ها در سمت پایین‌دست به هم ملحق می‌شوند و دشت سراب را به وجود می‌آورند. ازنظر زمین‌ساختی، تشکیل دشت سوبسیدانس سراب وابسته به فاز تکتونیکی میوپلیوسن است و این حوضه اغلب از رسوب‌های میوسن، پلیوسن کواترنر با ضخامت زیاد پوشیده شده است. گسل‌های متعددی در شکل‌گیری آن مؤثر بوده‌اند که در این میان گسل‌های دامنه شمالی بزقوش و دامنه جنوب سبلان، نقش اساسی در شکل‌گیری آن داشته‌اند. سازندهای زمین‌شناسی که در منطقه برونزد دارند، به ترتیب سنی از قدیم به جدید شامل؛ کنگلومرا و ماسه‌سنگ به سن پلیومیوسن Ngc، مارن ژیپسی ماسه‌سنگ دار به سن میوسن Mmg، ولکانیک‌های پلیوسن Plv، کنگلومرا و ولکانیک‌های پلیوکواترنر Plqv و PLqc و پادگانه‌های آبرفتی Qt به سن کواترنر است. نوع اقلیم دشت نیز، بر اساس روش آمبرژه، نیمه‌خشک سرد است.



شکل ۱- نقشه موقعیت محدوده موردمطالعه

۲-۲- داده‌ها و ابزارهای مورد استفاده

پژوهش حاضـــر از نوع کاربردی بوده و روش تحقیق آن تحلیلی مبتنی بر تلفیق آنالیز داده‌ها، ســیســـتم اطلاعات جغرافیـایی و اســـتفاده از فنون تحلیل چند معیاره اســـت. جهت پردازش تصـــاویر و تجزیه‌وتحلیل داده‌ها نیز از نرم‌افزارهای ENVI, Ecognition, Arc GIS، Idrisi و Excel بهره‌گیری شـــده اســـت. جهت پهنه‌بندی، خطر فرونشـــســـت، در مرحله جمع‌آوری داده‌ها، ابتدا باید مؤلفه‌های تأثیرگذار مشـــخص شـــده و بر مبنای آن‌ها داده‌ها و اطلاعات موردنیاز گردآوری و طبقه‌بندی شوند. بدین منظور، در این مطالعه، ابتدا عوامل مؤثر (شامل: شیب، لیتولوژی، کاربری اراضـی، بارش، فاصـله از شـهر و روستا، فاصله از رودخانه، فاصله از گسل و افت سطح آب زیرزمینی)، با بررسی نمونه مطالعات انجام شده در رابطه با خطر فرونشست که توسط دیگر پژوهشگران صورت پذیرفته و عوامل مؤثر در ایجاد فرونشست را بیان داشته‌اند ((مانند، کیانی و همکاران (۱۳۹۷)، منتظریون و اصلانی (۱۳۹۸)، ابراهیمی و همکاران (۱۳۹۹)، فرزین کیا و همکاران (۱۴۰۰)، اصـغری سـراسـکانرود و همکاران (۱۴۰۱)، روسـتایی و همکاران (۱۴۰۱)، گامبولاتی و همکاران (۲۰۱۸)، تانگ مین و همکاران (۲۰۱۹)، هوانگ و همکاران (۲۰۲۰)، رنجبر و همکاران (۲۰۲۱) و گرج و همکاران (۲۰۲۲)) و با توجه به شـرایط طبیعی و انسـانی منطقه، شـناسـایی گردید. در مرحله بعد لایه‌های اطلاعاتی مربوط به هر یک از عوامل، در محیط ســیســـتم اطلاعات جغرافیایی تهیه گردید. لایه‌های اطلاعاتی شـبکه آبراهه، با استفاده از نقشۀ رودخانه‌های استان آذربایجان شرقی، تهیه گردید. لایه‌های شیب نیز با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی ۱۲/۵ متر، دانلود شده از سایت (vertex.daac.asf.alaska.edu)، تهیه شد. لایه‌های اطلاعاتی مربوط به لیتولوژی (مقاومت سنگ‌ها) و گسل‌ها، با رقومی‌سازی از روی نقشه زمین‌شناسی استان؛ با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ تهیه شـد. برای اسـتخراج کاربری اراضـی محدوده موردمطالعه، از تصـاویر لندست هشت، سنجنده (OLI)، اخذ شده از سایت (earthexplorer.usgs.gov)، استفاده شده است. در این راستا، ابتدا تصحیحات هندسی و اتمسفری بر روی تصـاویر با اسـتفاده از روش Flaash، در نرم‌افزار Envi انجام شـد. سـپس طبقه‌بندی با روش شـیءگرا و الگوریتم نزدیک‌ترین همسایگی در نرم‌افزار Ecognition Developer، صورت گرفت و نتایج حاصله از طبقه‌بندی کاربری‌ها، چه ازنظر تک‌تک کاربری‌ها و چه ازنظر مجموع صحت و آمار کاپا، از صحت قابل قبولی (بزرگ‌تر از ۸۵ درصد)، در ارتباط با اطلاعات تولیدشده برخوردار می‌باشد. به‌منظور پایش سطح آب‌های زیرزمینی منطقه موردمطالعه، از اطلاعات مربوط به ۳۴ چاه مشـاهده‌ای سـطح تراز پیزومتری دشت سراب (اخذ شده از سازمان آب منطقه‌ای استان آذربایجان شـرقی) اسـتفاده گردید و سـپس با توجه به اینکه تخمینگر کریجینگ بهترین تخمینگر خطی نااُریب است (قربانی و همکاران، ۱۳۹۷) و با نظر به مقادیر ضـریب تعیین بالاتر، میزان خطا و واریانس تخمینی کمتر این روش در تهیه نقشه سـطح آب نسـبت به دیگر روش‌ها که (کماسـی و همکاران، ۱۳۹۶)، (اسـفندیاری و همکاران، ۱۳۹۷)، (اصـغری سـراسـکانرود و همکاران، ۱۴۰۱)، نیز در مطالعات خود بدان اشاره داشته‌اند، درنهایت با استفاده از روش کریجینگ،

نقشه عمق آب دشت سراب استخراج گردید. سپس با اجرای مراحل تکنیک مارکوس و کوداس نسبت به تهیه نقشه پهنه‌بندی خطر فرونشست اقدام شد.

۲-۳- مراحل تهیه نقشه پهنه‌بندی خطر فرونشست با استفاده از روش مارکوس (MARCOS[1])

۱- تعیین معیـارها و گزینه‌های پژوهش: اولین گام در این روش تعیین عوامل و گزینه‌های پژوهش اســـت. ۲- تشـکیل ماتریس تصـمیم: ماتریس تصـمیم در این روش نیز به‌صـورت معیار-گزینه اسـت؛ یعنی یک ماتریسـی که سـتون‌های آن را معیارهای مساله و سطرها را گزینه‌ها تشکیل می‌دهند و هر سلول نیز در واقع امتیاز هر گزینه نسبت به هر معیار اسـت. ۳- تعیین ایده آل و ضد ایده آل: در این بخش بر اساس روابط ۱ و ۲، مقادیر ایده آل (AI) و ضد ایده آل (AAI) مشـخص می‌شـود. در روابط زیر، عبارت B به معنی معیارهایی که جنبه سـود و عبارت C به معنی معیارهای که جنبه هزینه دارند.

$$AI = \max x_{ij}\ if\ j \in B\ and \min x_{ij}\ if\ j \in C$$ رابطه ۱

$$AAI = \min x_{ij}\ if\ j \in B\ and \max x_{ij}\ if\ j \in C$$ رابطه ۲

۴- نرمال کردن ماتریس تصـمیم یا استانداردسازی: در پژوهش حاضر، جهت دستیابی به الگوی پهنه‌بندی مکانی خطر زمین‌لغزش، مرحله استانداردسازی، با توجه به تابع عضویت فازی صورت پذیرفت. ۵- وزن‌دار کردن ماتریس نرمال: در این پژوهش، جهت وزن‌دهی عوامل از روش CRITIC استفاده شده است. ۶- محاسبه مطلوبیت هر گزینه: در این مرحله، بر اساس روابط ۳ و ۴، درجه مطلوبیت ایده آل- K+ و ضد ایده آل K- گزینه‌ها محاسبه می‌شود.

$$K_{i^+} = \frac{S_i}{S_{ai}}$$ رابطه ۳

$$K_{i^-} = \frac{S_i}{S_{aai}}$$ رابطه ۴

در روابط فوق، Si=(i=1,2,3,..m) جمع مقادیر هر سـطر در ماتریس وزن‌دار می‌باشـد که از رابطه ۵، به دسـت می‌آید.

$$S_i = \sum_{j:1}^{n} v_{ij}$$ رابطه ۵

۷-تعیین عملکرد نهـایی و رتبـه‌بنـدی گزینه‌ها: در این بخش با اســـتفاده از رابطه ۶، عملکرد مطلوب هر گزینه محاسبه می‌شود.

[1] Measurement Alternatives and Ranking according to Compromise Solution

رابطه ٦
$$f(k_i) = \frac{k_i^+ + k_i^-}{1 + \frac{1-f(k_i^+)}{f(k_i^+)} + \frac{1-f(k_i^-)}{f(k_i^-)}}$$

در رابطه فوق‌الذکر f(k-)، عملکرد مطلوبیت ضد ایده- آل و f(k+) عملکرد مطلوب ایده آل برای هر گزینه است که از روابط ۷ و ۸ محاسبه می‌شود. سپس بر اساس اعداد به دست آمده از f(k)، هر گزینه رتبه‌بندی انجام می‌شود. هرکدام از گزینه‌ها مقدار f(k) بزرگ‌تری داشت رتبه بهتری دارد (جهانگیری،۱۳۹۹؛ جهانگیری، ۱٤۰۰).

رابطه ۷
$$f(k_i^-) = \frac{k_i^+}{k_i^+ + k_i^-}$$

رابطه ۸
$$f(k_i^-) = \frac{k_i^-}{k_i^+ + k_i^-}$$

۲-٤- مراحل تهیه نقشه پهنه‌بندی خطر فرونشست با استفاده از روش کوداس (CODAS)[1]

۱- تعیین معیارها و گزینه‌های پژوهش: اولین گام در این روش تعیین عوامل و گزینه‌های پژوهش است. ۲- دومین گام در این روش تشکیل ماتریس تصمیم است. در ماتریس تصمیم روش کوداس معیارهای آن ستون‌ها و سطرهای آن گزینه‌های پژوهش هستند. ۳- سومین گام استانداردسازی ماتریس تصمیم می‌باشد که در این مطالعه، استانداردسازی و ارزش‌گذاری به‌صورت توأم با استفاده از روش فازی انجام شده است. ٤- تشکیل ماتریس نرمال وزن‌دار: باید وزن معیارها را در ماتریس نرمال ضرب کرد. در این پژوهش جهت وزن‌دار کردن ماترس نرمال، از روش CRITIC استفاده شده است. ٥- محاسبه فواصل اقلیدسی (Euclidean distance) و تاکسی (Taxicab distances) از ایده آل منفی: این فواصل از روابط ۹ و ۱۰، به دست می‌آیند. در این روابط ns_j ایده آل منفی معیارها است.

رابطه ۹
$$E_i = \sqrt{\sum_{j=1}^{m}(r_{ij} - ns_J)^2}$$

رابطه ۱۰
$$T_i = \sum_{j=1}^{m}\left|r_{ij} - ns_J\right|$$

٦- ایجاد ماتریس ارزیابی نسبی: در این گام باید ماتریس ارزیابی نسبی را با استفاده از رابطه ۱۱، ایجاد شود که در این رابطه، Ψ نشان‌دهنده یک تابع آستانه برای تشخیص برابری فاصله اقلیدسی دو گزینه است.

رابطه ۱۱
$$h_{iK} = (E_i - E_k) + (\psi(E_i - E_k) \times (T_I - T_k))$$

1 Combinative Distance-based Assessment

۷- در این گام با جمع مقادیر h_{ik} گزینه‌ها، می‌توان آن‌ها را رتبه‌بندی نمود هر چه مقدار H_i بزرگ‌تر باشد گزینه رتبه بهتری دارد (متیو و ساهو[1]، ۲۰۱۸).

۲-۵- وزن‌دهی CRITIC[2] (اهمیت معیارها، از طریق همبستگی بین معیارها)

در این روش، داده‌ها بر اساس میزان تداخل و تضادّ موجود بین عوامل یا معیارها مورد تجزیه‌وتحلیل قرار می‌گیرد. در این روش، پس از محاسبهٔ انحراف معیار معیارهای موردبررسی، ماتریس متقارنی به ابعاد m×m ایجاد می‌گردد که شامل ضرایب همبستگی بین بردارهای تشکیل شده است. با تعیین پارامترهای بالا، تضادّ موجود بین معیار j با معیارهای دیگر از روی رابطهٔ ۱۲، محاسبه می‌شود.

رابطه ۱۲
$$Cjk = \sum_{k=1}^{m}(1 - rjk)$$

که در آن Cjk معرّف مجموع تضادّ معیار j با معیارهای k است که از k = 1 شروع شده و تا k = m ادامه دارد و rjk، همبستگی بین دو معیار k و j را نشان می‌دهد. میزان اطّلاعات عامل j را می‌توان با استفاده از رابطهٔ ۱۳، محاسبه نمود.

رابطه ۱۳
$$Cj = \delta j \sum_{k=1}^{m}(1 - rjk)$$

که در آن Cj، معرّف میزان اطّلاعات معیار j و انحراف معیار در مقادیر مربوط به عامل یا معیار j را نشان می‌دهد. با توجّه به روابط یادشده، معیارهایی که دارای Cj بیشتری باشند وزن زیادی به خود اختصاص خواهند داد. وزن هر عامل مانند j از رابطهٔ ۱۴، تعیین می‌گردد.

رابطه ۱٤
$$Wj = \frac{Cj}{\sum_{k=1}^{m} C_k}$$

که در آن Wj معرّف وزن معیار j و Ck نشانگر میزان اطّلاعات مجموع معیارهای k است که از k = 1 شروع شده و تا k = m ادامه دارد. لذا، وزن نهایی هر معیار، از تقسیم میزان اطلاعات هر معیار بر مجموع میزان کل اطلاعات تمامی معیارها به دست می‌آید است (علی‌نژاد و خلیلی[3]، ۲۰۱۹). در راستای انجام مراحل وزن‌دهی کرتیک ابتدا در محیط ادریسی انحراف معیار و همبستگی میان لایه‌های اطلاعاتی مربوطه به هر یک از عوامل، با استفاده از تابع REGRESS، به دست آمد و در مرحله بعد، با توجه به روابط مربوطه نسبت به محاسبه ماتریس تضاد، میزان اطلاعات و وزن نهایی در اکسل، اقدام گردید.

1 Mathew & Sahu
2 CRiteria Importance Through Intercriteria Correlation
3 Alinezhad & Khalili

۲-٦- استانداردسازی فازی

در پیاده‌سازی تمامی الگوریتم‌های مورد استفاده در پژوهش حاضر و جهت دستیابی به الگوی پهنه‌بندی مکانی خطر فرونشست در دشت سراب، مرحله استانداردسازی، با توجه به تابع عضویت فازی انجام شده است (جدول ۱). استاندارد نمودن داده‌ها به معنی همسان‌کردن دامنهٔ تغییرات داده‌ها بین صفر و یک و یا یک دامنهٔ مشخّص دیگر است. در مجموعه‌های فازی، بیشترین ارزش یعنی مقدار یک به حداّکثر عضویّت و کمترین ارزش یعنی صفر به حداّقل عضویّت در مجموعه تعلّق می‌گیرد (حسینی[1]، ۲۰۱۹).

جدول۱- نوع توابع فازی‌ساز لایه‌های موضوعی تأثیرگذار بر خطر فرونشست محدوده موردمطالعه

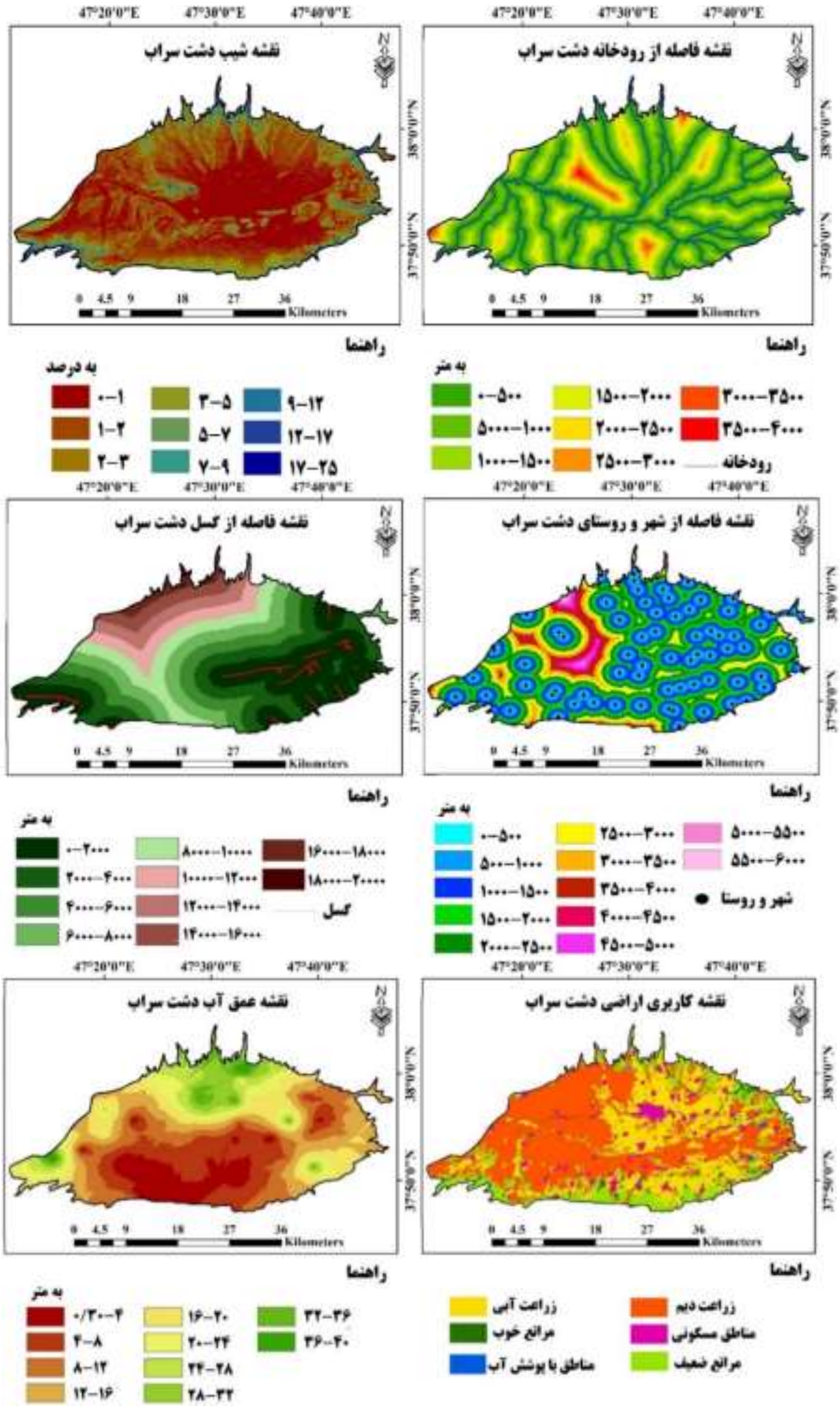
متغیر	توضیحات	نوع تابع فازی
شیب	با کاهش مقدار شیب، خطر فرونشست افزایش می‌یابد.	تابع خطی کاهشی
کاربری اراضی	اختصاص کدها بر اساس اهمیت آن در وقوع خطر فرونشست و سپس فازی کردن.	تابع بزرگ فازی
فاصله از شهر و روستا	در مناطق مجاور از شهر و روستا، پتانسیل وقوع مخاطره فرونشست افزایش می‌یابد.	تابع نزدیک فازی
فاصله از گسل	در مناطق مجاور خطوط گسل، پتانسیل وقوع مخاطره فرونشست افزایش می‌یابد.	تابع نزدیک فازی
لیتولوژی	اختصاص کدها بر اساس اهمیت آن در وقوع خطر فرونشست و سپس فازی کردن.	تابع بزرگ فازی
فاصله از رودخانه	در مناطق مجاور رودخانه، پتانسیل وقوع مخاطره فرونشست کاهش می‌یابد.	تابع خطی کاهشی
افت سطح آب	با افزایش مقدار افت سطح آب، خطر فرونشست افزایش می‌یابد.	تابع خطی افزایشی

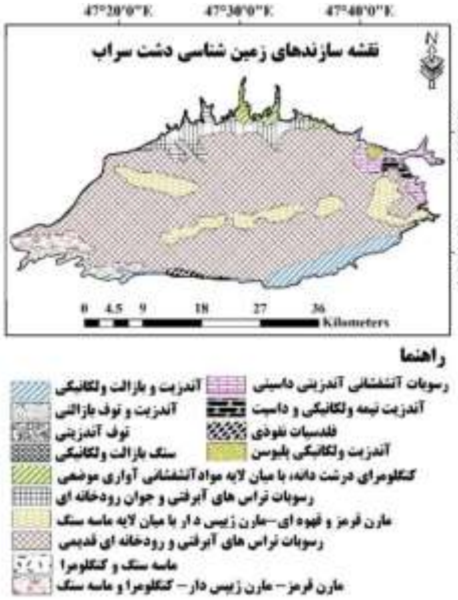
۳- نتایج و بحث

پس از استخراج نقشه‌های هر یک از معیارها (شکل ۲) و اعمال کردن وزن‌های مربوطهٔ حاصل از روش کرتیک (جدول ۲) و با اعمال مراحل مختلف تکنیک‌های مارکوس و کوداس، نقشه‌های پهنه‌بندی خطر فرونشست در ۵ طبقهٔ بسیار پرخطر تا بسیار کم خطر، به دست آمد (شکل ۳). با توجه به نتایج حاصله، به ترتیب معیارهای افت سطح آب، کاربری اراضی، شیب و زمین‌شناسی، بیش‌ترین وزن و اهمیت را دریافت کردند و با توجه به اینکه در وزن‌دهی کرتیک، وزن معیارها، با توجه به نقشه‌های معیار و میزان همبستگی، تضاد و انحراف معیار بین لایه‌های اطلاعاتی مورداستفاده، تعیین می‌گردد، استفاده از این روش، در وزن‌دهی معیارها در پژوهش حاضر می‌تواند معضل استقلال صفات از یکدیگر که به هنگام مقایسهٔ زوجی در چارچوب روش فرایند تحلیل سلسله مراتبی و فرآیند تحلیل شبکه‌ای وجود دارد را برطرف نماید.

---

1 Hoseini


نقشه شیب دشت سراب
راهنما
به درصد
۰–۱
۱–۲
۲–۳
۳–۵
۵–۷
۷–۹
۹–۱۲
۱۲–۱۷
۱۷–۲۵
نقشه فاصله از رودخانه دشت سراب
راهنما
به متر
۰–۵۰۰
۵۰۰–۱۰۰۰
۱۰۰۰–۱۵۰۰
۱۵۰۰–۲۰۰۰
۲۰۰۰–۲۵۰۰
۲۵۰۰–۳۰۰۰
۳۰۰۰–۳۵۰۰
۳۵۰۰–۴۰۰۰
رودخانه
نقشه فاصله از گسل دشت سراب
راهنما
به متر
۰–۲۰۰۰
۲۰۰۰–۴۰۰۰
۴۰۰۰–۶۰۰۰
۶۰۰۰–۸۰۰۰
۸۰۰۰–۱۰۰۰۰
۱۰۰۰۰–۱۲۰۰۰
۱۲۰۰۰–۱۴۰۰۰
۱۴۰۰۰–۱۶۰۰۰
۱۶۰۰۰–۱۸۰۰۰
۱۸۰۰۰–۲۰۰۰۰
گسل
نقشه فاصله از شهر و روستای دشت سراب
راهنما
به متر
۰–۵۰۰
۵۰۰–۱۰۰۰
۱۰۰۰–۱۵۰۰
۱۵۰۰–۲۰۰۰
۲۰۰۰–۲۵۰۰
۲۵۰۰–۳۰۰۰
۳۰۰۰–۳۵۰۰
۳۵۰۰–۴۰۰۰
۴۰۰۰–۴۵۰۰
۴۵۰۰–۵۰۰۰
۵۰۰۰–۵۵۰۰
۵۵۰۰–۶۰۰۰
شهر و روستا
نقشه عمق آب دشت سراب
راهنما
به متر
۰/۳۰–۴
۴–۸
۸–۱۲
۱۲–۱۶
۱۶–۲۰
۲۰–۲۴
۲۴–۲۸
۲۸–۳۲
۳۲–۳۶
۳۶–۴۰
نقشه کاربری اراضی دشت سراب
راهنما
زراعت آبی
زراعت دیم
مراتع خوب
مناطق مسکونی
مناطق با پوشش آب
مراتع ضعیف
47°20'0"E
47°30'0"E
47°40'0"E
38°0'0"N
37°50'0"N
0 4.5 9 18 27 36 Kilometers

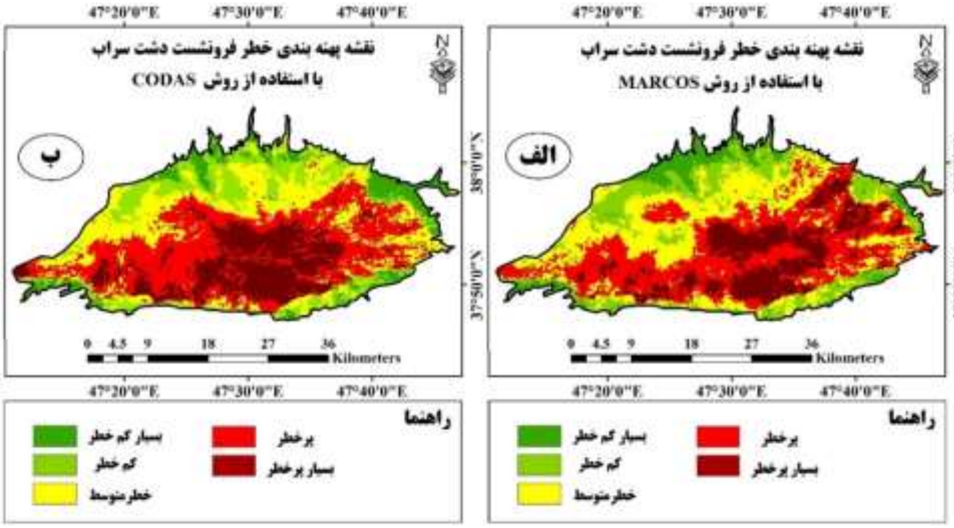


شکل ٢- نقشه معیارهای مطرح در پهنه‌بندی خطر فرونشست دشت سراب

جدول ٢- مجموع تضاد، انحراف معیار، میزان اطلاعات و وزن نهایی معیارهای مطرح

معیار	مجموع تضاد	انحراف معیار	میزان اطلاعات	وزن نهایی
زمین‌شناسی	٢/٩١٤	٠/٢٥٣	٠/٧٣٧	٠/١٢٣
کاربری اراضی	٢/٨٧٤	٠/٣٥٥	١/٠٢٢	٠/١٧١
فاصله از گسل	٢/٢٣٧	٠/٣١٥	٠/٧٠٦	٠/١١٨
شیب	٣/١٤٨	٠/٣٠٣	٠/٩٥٤	٠/١٥٩
فاصله از رودخانه	٢/٨٧٨	٠/٢٣٥	٠/٦٧٨	٠/١١٣
سطح آب	٣/٢٣٩	٠/٣٥٧	١/١٥٩	٠/١٩٤
فاصله از شهر و روستا	٢/٨٧٣	٠/٢٤٨	٠/٧١٤	٠/١١٩

با توجه به خروجی حاصـــل از به‌کارگیری روش مارکوس، ١٦٧/٥٠ کیلومترمربع از مســـاحت محدوده در کلاس بســـیار پرخطر و ٢٧٦/٠٩ کیلومترمربع در کلاس پرخطر قرار دارد و طبق نتایج حاصـــل از به‌کارگیری روش کوداس، ١٨٧/١٣ و ٢٧٩/٠٣ کیلومترمربع از مســـاحت محدوده، در طبقهٔ بســـیار پرخطر و پرخطر قرار دارد (جدول ٣). به‌طور کلی؛ با توجه به نتایج هر دو روش مورداســـتفاده، بخش اعظمی از کلاس بســـیار پرخطر و پرخطر از لحاظ احتمال وقوع فرونشست با راستای شرقی-غربی و در قسمت مرکزی دشت، قرار گرفته است.



شکل ٣- نقشه پهنه‌بندی خطر فرونشست دشت سراب الف: با استفاده از الگوریتم MARCOS، ب: با استفاده از الگوریتم CODAS

جدول ٣- اطلاعات طبقات خطر فرونشست دشت سراب با استفاده از الگوریتم‌های تصمیم‌گیری چند معیاره CODAS و MARCOS

	طبقۀ خطر	بسیار پرخطر	پرخطر	خطر متوسط	کم‌خطر	بسیار کم‌خطر
MARCOS	مساحت به کیلومترمربع	١٦٧/٥٠	٢٧٦/٠٩	٢٥٤/٦٨	١٥٢/٣٨	٦٧/٧٥
	مساحت به درصد	١٨/٢٤	٣٠/٠٦	٢٧/٧٣	١٦/٦٠	٧/٣٧
CODAS	مساحت به کیلومترمربع	١٨٧/١٣	٢٧٩/٠٣	٢٢٩/٠٦	١٤٣/٢٨	٧٩/٩٠
	مساحت به درصد	٢٠/٣٨	٣٠/٣٨	٢٤/٩٤	١٥/٠ ٦	٨/٧٠

کاربری اراضی یکی از مؤلفه‌های اساسی در پژوهش و بررسی فرونشست و نیز پهنه‌بندی این خطر در یک منطقه می‌باشد و نوع کاربری زمین، خصوصیات سطحی زمین را تحت تأثیر خود قرارداده و موجب تغییر رفتار مواد آن در مقابل فرآیندهای زمین‌شناسی منطقه، می‌گردد. انواع کاربری در دشت سراب به‌صورت نواحی انسان‌ساخت (مسکونی)، مرتع خوب، مرتع ضعیف، پوشش برف دائمی، دیم‌زار، زراعت آبی و مناطق آبی می‌باشد. بررسی نقاط بسیار پرخطر و پرخطر معرفی شده توسط هر دو الگوریتم مارکوس و کوداس، نشان می‌دهد؛ از لحاظ معیار کاربری اراضی، کاربری‌های زراعی و مناطق شهری، بیشترین مقدار از مساحت مناطق دارای احتمال خطر بسیار زیاد و زیاد را به خود اختصاص داده است. دشت سراب، شهر سراب را احاطه کرده و دارای کشتزارها و مراتع وسیع است و به‌طور کلی؛ این دشت به دلیل وضعیت ژئومورفولوژیکی مناسب، محدودیت کمی جهت توسعه فعالیت‌های کشاورزی دارد. در واقع نداشتن اختلاف ارتفاع، نداشتن شیب زیاد (دشت سراب دارای زمین‌های نسبتاً هموار کم

شیبی است که شیب آن به کمتر از ٥ درصد می‌رسد)، وجود رسوبات آبرفتی مناسب در کنار عوامل اقتصادی منطقه، سبب شده است تا فعالیت‌های کشاورزی این منطقه با گسترش زیادی همراه باشد (شکل ٤)، به‌طوری‌که بر اساس نقشه کاربری اراضی محدوده مطالعاتی، به ترتیب؛ ٢٧٥/٨٤ و ٤٤٢/٢٢ کیلومترمربع از مساحت دشت به اراضی زراعت آبی و دیم، اختصاص داده شده است و سراب را به یکی از قطب‌های کشاورزی و دامداری استان آذربایجان شرقی تبدیل کرده است و حتی زمین‌هایی که قبلاً در آن‌ها کشت صورت نگرفته بود با ورود ماشین‌آلات جدید کشاورزی به منطقه شخم زده شده است که همین عامل سبب بهره‌برداری بیش‌ازحد از سفره آب‌های زیرزمینی و افزایش پتانسیل رخداد خطر فرونشست، در طی سال‌های اخیر شده است.



شکل ٤- تصاویری از پراکنش اراضی کشاورزی واقع در دشت سراب

می‌توان بیان داشت که عوامل انسان‌ساخت مانند؛ زمین‌های کشاورزی، خطوط انتقال نیرو و عملیات حفاری، سکونت‌گاه‌های شهری و روستایی و شبکه‌های حمل‌ونقل جاده‌ای با افزایش مصرف آب‌های سطحی، زیرزمینی، تحمیل بار وارده بر زمین در اثر احداث ساختمان‌های بزرگ و تراکم زیرساخت‌ها میزان آسیب‌پذیری این واحد را افزایش داده و سبب تشدید فرونشست می‌شوند و در دشت سراب بخش اعظمی از آب موردنیاز جهت شرب نقاط شهری و روستایی، از منابع آب زیرزمینی تأمین می‌گردد و این امر نیز به نوبه خود در کاهش سطح آب به دنبال آن، در افزایش پتانسیل خطر فرونشست در محدوده موردمطالعه دخیل می‌باشد. به‌طور کلی، فاصله از مناطق شهری و روستایی در محدوده مطالعاتی بین صفر تا ٦٠٠٠ متر می‌باشد. از لحاظ معیار فاصله از مناطق شهری و روستایی، بر اساس خروجی حاصل از روش مارکوس، مناطق بسیار پرخطر در فاصله صفر تا ٢٥٠٠ متری و طبق نتایج حاصل از به‌کارگیری روش کوداس، در فاصله صفر تا ٣٠٠٠ متری از نقاط شهری و روستایی قرار دارند و در این مناطق به

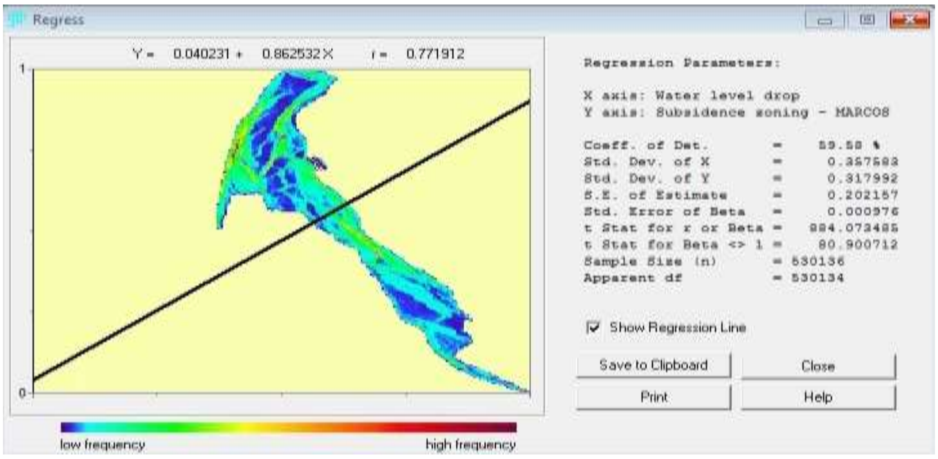
ســبــب تأمین نیازهای آبی جامعه ســکونتگاهی و مناطق اطراف و همچنین تأمین نیازهای آبی بخش کشــاورزی، دســت‌اندازی به منابع آبی بیشتر بوده و اســتحصال آب‌های زیرزمینی بسیار بالاست به همین دلیل میزان افت نیز بالا بوده است. نمونه‌هایی از بهره‌برداری‌های بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی به‌صورت لوله‌کشی و پمپاژ آب چاه‌های حفر شده و تأمین نیازهای آبی اراضی کشاورزی واقع در دشت سراب، در شکل ۵، نمایش داده شده است.



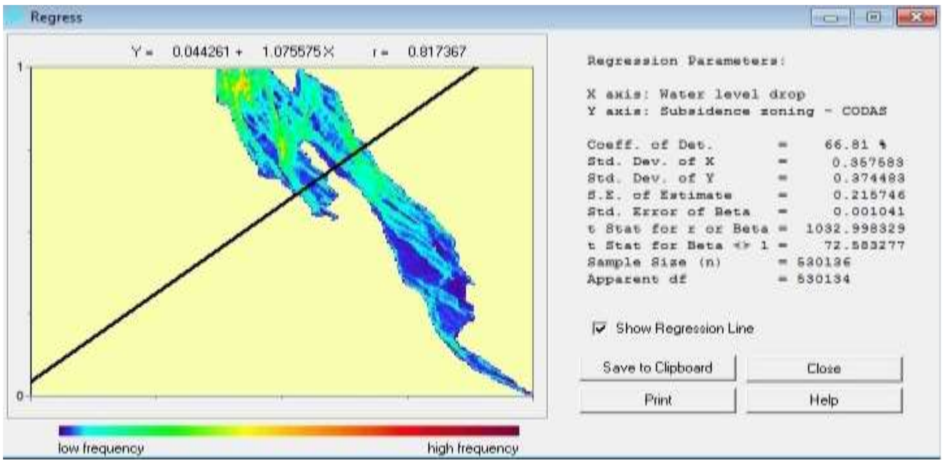
شکل ۵- نمونه‌هایی از استحصال آب‌های زیرزمینی و تأمین نیازهای آبی اراضی کشاورزی موجود در دشت سراب

اعمال فشــار بیش‌ازحد بر آبخوان ممکن اســت موجب بروز پدیدهٔ فرونشست شود؛ ازاین‌رو به بررسی وضعیت سـفرهٔ آب زیرزمینی در محدودهٔ موردمطالعه پرداخته شـد. با توجه به نقشه افت سطح آب مستخرج شده از داده‌های چاه‌های پیزومتری دشت سراب، بیشترین افت سطح آب در بخش میانی دشت (از عمق ۱۲ متر به ۰/۳۰ متر) مشاهده می‌شـود که احتمال وقوع فروشست نیز، در این قسمت از محدوده افزایش می‌یابد. ارتباط نقشه‌های نهایی حاصل از پهنه‌بندی خطر فرونشــســت با نقشــه معیار سـطح آب محدوده موردبررســی قرار گرفت و طبق نتایج حاصله، نقشه مستخرج از الگوریتم MARCOS، با عمق سطح آب چاه‌ها دارای مقدار ضریب همبستگی ۰/۷۷ می‌باشد (شکل ٦) و نقشه پهنه‌بندی فرونشست به دست آمده از الگوریتم CODAS، با نقشه عمق سطح آب چاه‌ها، ضریب همبستگی ۰/۸۱ را نشان می‌دهد (شکل ۷). می‌توان بیان داشت که بین خروجی هر دو روش با نقشه سطح آب همبستگی دیده می‌شود. صدری‌کیا (١٤٠١)، نیز در پژوهش خود؛ به این نتیجه دست یافته است که در دشت سراب، در مناطق دارای فرونشست زیاد، کاهش چندم‌تری سطح ایستابی وجود داشته و بین سطح ایستابی و جابه‌جایی‌های سطح زمین رابطه آماری معنی‌دار وجود دارد و رابطه بین دو متغیر مستقیم است. به‌علاوه ضریب تعیین روش CODAS، ٦٦/٨١ درصد و ضـریب تعیین روش MARCOS، ۵۹/۵۸ درصـد می‌باشـد؛ به عبارت دیگر طبق نتیجه حاصل از روش کوداس

٦٦/٨١ درصـد از علت وقوع فرونشـسـت در دشت سراب، با نظر به مقایسه نقشه نهایی پهنه‌بندی حاصل از مدل با نقشـه سـطح آب، مربوط به معیار سطح آب است و ٣٣/١٩ درصد از علت رخداد فرونشست دشت سراب به دیگر عوامل مربوط می‌باشـد. همچنین؛ طبق مقایسه انجام شده بین نقشه نهایی پهنه‌بندی حاصل از روش مارکوس با نقشه سـطح آب، معیار سـطح آب، ۵٩/۵٨ درصـد از علت وقوع فرونشـسـت را نشان می‌دهد و ٤٠/٤٢ درصد از احتمال فرونشست محدوده با دیگر معیارها در ارتباط است. با نظر به نقش و اهمیت معیار افت سطح آب و با توجه به اینکه، معیار سـطح آب بیش‌ترین وزن و اهمیت را در پتانسـیل وقوع فرونشـسـت در سطح دشت سراب دارد، می‌توان بیان کرد کـه میزان موفقیـت روش CODAS، بـا توجـه بـه مقـایسـه خروجی نهـایی مـدل بـا معیـار سـطح آب، از روش MARCOS، بیشتر است.



شکل ٦- رابطه همبستگی بین نقشه عمق سطح آب و خروجی حاصل از الگوریتم MARCOS



شکل ٧- رابطه همبستگی بین نقشه عمق سطح آب و خروجی حاصل از الگوریتم CODAS

ویژگی‌های سـنگ‌شـناسـی بەطور گسـترده بر ویژگی‌های فیزیکی، مانند؛ استحکام و نفوذپذیری مواد سطحی و زیرسـطحی و احتمال خطر فرونشـسـت تأثیر می‌گذارد. از منظر سـازندهای زمین‌شناسی، به‌طور کلی شهر سراب و روسـتاهای موجود در محدوده دشت سراب، بر روی رسوبات آبرفتی شکل گرفته‌اند و به‌طور عمده، بیشتر مساحت دشـت سـراب از واحدهای کواترنری (رسـوبات پادگانـه‌هـای آبرفتی و رودخانه‌ای قدیمی به مسـاحت ٦٣٠ کیلومترمربع، رسوبات پادگانـه‌هـای آبرفتی و رودخانه‌ای جدید به مساحت ٥٧/٠٨ کیلومتر) و آندزیت و بازالت آتشـفشـانی به مسـاحت ٤٧/٥٠ کیلومترمربع و مارن قرمز و قهوه‌ای، مارن ژیپس‌دار با میان لایه‌های ماسـه سـنگ به مسـاحت ٣٣/٤٧ کیلومترمربع، اسـت. بررسـی مناطق بسـیار پرخطر و پرخطر معرفی شده توسط هر دو الگوریتم نیز نشان می‌دهد؛ از لحاظ معیار زمین‌شناسی، نقاط دارای احتمال خطر در رسوبات پادگانـه‌هـای آبرفتی و رودخانه‌ای قدیمی و مارن قرمز و قهوه‌ای، مارن ژیپس‌دار با میان لایه‌های ماسـه سـنگ قراردارند و در سـایر بخش‌ها به واسـطه شـیب نسـبی بیش‌تر و نبود رسـوبات آبرفتی زمینه برای وقوع فرونشست بسیار کمتر است. مقدار شیب در محدوده موردمطالعه، بین صـفر تا ٢٥ درصـد می‌باشد. محدوده شیب ٢-٠ کمترین میزان شیب در محدوده منطقه می‌باشد که این شیب نقش موثری در جمع‌آوری منابع آب زیرزمینی فراهم می‌آورد و هر چه میزان شیب افزایش می‌یابد از میزان تمرکز چاه‌ها کاسـته و میزان فرونشست زمین هم کاهش می‌یابد. بر اساس نقشه پهنه‌بندی حاصل از هر دو الگوریتم مورد اسـتفاده در این پژوهش، از لحاظ معیار شیب، مناطق دارای احتمال خطر زیاد و بسیار زیاد، بین شیب‌های صفر تا ٥ درصـد قرار دارند و به‌طور عمده بیشـترین مقدار پیکسـل‌های با احتمال خطر، دارای شـیب کمتر از ٢ درصـد، هستند.

به دلیل اثر گذاشـتن فعالیت گسـل‌ها (نظیر زلزله) بر روی فرونشـسـت زمین، بررسی گسل‌های منطقه ضرورت می‌یابد. گسل‌ها به‌نوبه خود نقش مؤثر و مهمی در میزان توسعه فرونشست در سطح دشت دارد. به‌گونه‌ای که هر چه میزان فاصـله از خطوط گسـل بیش‌تر باشـد نشـان‌دهنده این است که منطقه تناسب کمتری برای احتمال فرونشست زمین را دارا بوده و هر چه میزان فاصـله به خطوط گسـل نزدیک‌تر شـود احتمال وقوع فرونشـست بیش‌تر می‌شود. گسـل‌هـای فراوانـی در جهـت مختلـف در واحـدهای سنگی اطراف دشت سراب دیده می‌شود. ولـی مهـم‌تـرین آن‌ها، گسل میانی دشت سـراب بـا جهـت تقریبـی شـرقی-غربی است و تقریباً به موازات رودخانه آجی‌چای امتداد یافته است. این گسل از نوع فعّال است و نشانه فعّال بـودن آن چین‌خـوردگی و جابـه‌جایی رسـوبات نئـوژن گـاهی جوان‌تر اسـت. در اثر فعالیت این گسـل واحدهایی از کنگلومرا، مارن گچ‌دار ماسه سنگ خاکستری، مارن‌های با میان لایه آهکی و همچنین مارن خاکسـتری گچ‌دار و نمک‌دار در کنار هم قرار گرفته‌اند. با بررسی معیار فاصله از گسل به این نتیجه دسـت‌یافتیم که طبق نقشـه پهنه‌بندی خطر فرونشست به دست آمده از روش مارکوس، پهنه‌های با احتمال

خطر زیاد و بسیار زیاد در فاصله صفر تا ۸۰۰۰ متری، از گسل واقع شده‌اند و بر اساس نتایج حاصل از روش کوداس، مناطق پرخطر و بسیار پرخطر، در فاصله صفر تا ۱۲۰۰ متری، از گسل قرار دارند.

عامل نزدیکی به رودخانه به‌عنوان عامل مزاحم در ایجاد فرونشست مطرح می‌باشد و با فاصله گرفتن از رود امتیاز بیشتری به زمین‌های منطقه تعلق می‌گیرد. هر چه از آبراهه‌ها فاصله می‌گیریم نیاز استفاده از آب‌های زیرزمینی به دلیل عدم وجود و استفاده از آب‌های سطحی بالا می‌رود و در پی استفاده نادرست از آب‌های زیرزمینی و افت سطح آب‌های زیرزمینی، میزان احتمال فرونشست افزایش می‌یابد. رودخانه‌های اصلی جاری در دشت سراب؛ بیوک‌چای، تاجیارچای، رازلیق‌چای، وانق‌چای می‌باشد و منابع تغذیه دشت عمدتاً آب‌های نفوذیافته از جریان‌های سطحی ارتفاعات حاشیه دشت و همچنین نفوذ آب حاصل از باران بر سطح دشت است. هر چه از آبراهه‌ها فاصله می‌گیریم نیاز استفاده از آب‌های زیرزمینی به دلیل عدم وجود و استفاده از آب‌های سطحی بالا می‌رود و در پی استفاده نادرست از آب‌های زیرزمینی و افت سطح آب‌های زیرزمینی، میزان احتمال فرونشست افزایش می‌یابد. به‌طور کلی، فاصله از آبراهه‌ها در محدوده مطالعاتی بین صفر تا ٤۰۰۰ متر می‌باشد و با انطباق نقشه پهنه‌بندی خطر فرونشست حاصل از هر دو روش مورد استفاده در مطالعه حاضر، با نقشه معیار فاصله از رودخانه؛ می‌توان گفت که به‌طور عمده مناطق دارای احتمال خطر در فاصله صفر تا ۲۰۰۰ متری از رودخانه قرار دارند.

٤- جمع‌بندی

در این پژوهش با استفاده از الگوریتم‌های تصمیم‌گیری چند معیاره CODAS و MARCOS به ارزیابی و پهنه‌بندی خطر فرونشست دشت سراب، پرداخته شده است. بررسی‌های انجام‌گرفته در این تحلیل نشان داد که به ترتیب؛ افت سطح آب، کاربری اراضی، شیب و زمین‌شناسی، در وقوع فرونشست محدوده مطالعاتی، بیشترین اهمیت را دادند و می‌توان گفت که مهم‌ترین عامل اصلی دخیل در افزایش مقدار و پتانسیل فرونشست دشت سراب، بهره‌برداری بی‌رویه از آب زیرزمینی می‌باشد. در راستای تأیید نتیجه حاصله بایستی اشاره داشت که شرکت آب منطقه‌ای آذربایجان شرقی نیز، اعلام کرده است که سالانه ۱۵ میلیون مترمکعب آب از چاه‌های مجاز سراب اضافه برداشت می‌شود و همچنین، ناموری و صدری‌کیا (۱۳۹۹)، صدری‌کیا (۱٤۰۱)، در پژوهشی که در رابطه با بررسی فرونشست دشت سراب انجام داده‌اند، به این نتیجه دست یافته بودند که عدم کنترل و مدیریت مناسب منابع آب‌های زیرزمینی و افت سطح آب زیرزمینی به افزایش میزان فرونشست در دشت سراب منجر شده است، لذا نتیجۀ پژوهش حاضر، با نتایج این مطالعات نیز، هم‌خوانی دارد.

به‌علاوه، خروجی حاصل از هر دو روش MARCOS و CODAS، نشان‌دهندۀ توان بالای دشت سراب، از لحاظ خطر فرونشست می‌باشد و با توجه به این امر که فرونشست زمین می‌تواند خسارت‌های جبران ناپذیر مالی و جانی به دنبال داشته باشد و به بسیاری از سازه‌های سطحی و زیرسطحی در مناطق شهری و حومۀ آن، در محدوده

موردمطالعه آسیب برساند، لازم است تا سازمان‌های متولی فرونشست زمین، مثل؛ سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی، شرکت آب منطقه‌ای، جهاد کشاورزی، حفاظت از محیط‌زیست، منابع طبیعی و امور آبخیزداری و شهرداری‌ها، با انجام اقدامات مسئولانه و هم‌افزایی لازم، مانع کاهش ذخایر آبی و فرونشست‌های خطرآفرین برای حیات در منطقه انجام دهند. ازاین‌رو بایستی راهکارهای بلندمدت و کوتاه مدت، به‌صورت اصلاح روش‌های مدیریت منابع آب، جلوگیری از برداشت سفره‌های آب زیرزمینی، توقیف تجهیزات حفاری غیرمجاز، ساماندهی شرکت‌های حفاری، پایش مستمر مناطق مستعد فرونشست، ایجاد سدهای زیرزمینی به‌منظور افزایش تراز آب و کاهش فرونشست، مهار آب‌های سطحی و اجرای طرح‌های تزریق مصنوعی آب به سفره‌های زیرزمینی منطقه (طبق گفتۀ رئیس اداره منابع آب شهرستان سراب که با توجه به آورده رودخانه‌های محلی، می‌توان سالانه حدود ۳ میلیون مترمکعب آب به این سفره‌ها تزریق کرد)، تهیه و نصب کنتور هوشمند و کنترل برداشت آب، آموزش عمومی کشاورزان محلی، کنترل شدید مصرف آب و تغییر الگوی مصرف، مورد توجه مسئولان ذی‌ربط و مربوطه و همچنین ساکنان محلی قرار گیرد.

درنهایت قابل ذکر است، همان‌گونه که می‌دانیم، هر یک از روش‌های مطالعۀ مخاطرات محیطی ازجمله فرونشست، به‌نوبه خود دارای مزایا و معایبی می‌باشند. این امر که یک روش در یک منطقه تا چه حد از کارایی برخوردار است به شرایط طبیعی و انسانی محدوده بستگی دارد. انتظار می‌رود، نتایج حاصل از پژوهش حاضر، با معرفی روش‌های تحلیل چند معیاره MARCOS و CODAS، که تاکنون در هیچ مطالعه‌ای با هدف پهنه‌بندی فرونشست مورد استفاده قرار نگرفته بوده‌اند، در امر انتخاب روش مناسب بررسی و پهنه‌بندی خطر فرونشست، مورد توجه پژوهشگران قرار گیرد.

کتابنامه

ابراهیمی، عطرین؛ قاسمی، افشان؛ گنجائیان، حمید؛ ۱۳۹۹. پایش میزان فرونشست محدوده شهری پاکدشت با استفاده از روش تداخل سنجی راداری. *جغرافیا و روابط انسانی*. دوره دوم. شماره ٤. صص ۲۹–٤۱.
20.1001.1.26453851.1399.2.4.3.1

اسفندیاری، فریبا؛ قراچورلو، مرتضی؛ عبادی، الهامه؛ ۱۳۹۷. ارزیابی و برآورد تغییرات مکانی سطح آب زیرزمینی در دشت سراب با استفاده از روش‌های مختلف درون‌یابی. *فصلنامه جغرافیا و توسعه*. دوره شانزدهم. شماره ۵۱. صص ۸۰–٦۵. https://doi.org/10.22111/GDIJ.2018.3860

اصغری سراسکانرود، صیاد؛ فعال نذیری، مهدی؛ الناز، پیروزی؛ ۱٤۰۱. پهنه‌بندی گسترۀ خطر فرونشست زمین در دشت مرکزی استان البرز با بهره‌گیری از تکنیک تداخل‌سنجی راداری و الگوریتم تحلیل چندمعیارۀ ARAS. *کوهیدرولوژی*. دوره نهم. شماره ۲. صص ۳۷۱–۳۵۳.
https://doi.org/10.22059/IJE.2022.336590.1596

تلسـچی امیرخیزی، مهناز؛ دلیر حسن‌نیا، رضا؛ حقیقت جو، پرویز؛ مجنونی هریس، ابوالفضل؛ ۱۳۹۸. تعیین کیفیت آب چاه‌های کشـاورزی دشـت سراب جهت استفاده در سیستم‌های آبیاری تحت‌فشار. *دانش آب‌وخاک*. دوره بیست و نهم. شماره ۲. صص ۱۹۸-۱۸۵. https://water-soil.tabrizu.ac.ir/article_9328.html

جهانگیری، عباس؛ ۱۳۹۹. تحلیل روند آبرسـانی به شهرها و روستاهای ایران و دفع فاضلاب از آن‌ها طی سال‌های ۹۱ تا ۹۷ با اسـتفاده از رویکرد ترکیبی تصـمیم‌گیری چند شاخصه. *تصمیم‌گیری و تحقیق در عملیات*. دوره ۵. شماره ۲. صص ۲٤۸-۲۳۳. https://doi.org/10.22105/dmor.2020.239925.1184

جهانگیری، عباس؛ ۱٤۰۰. انتخاب بهترین فرآیند تصـفیهٔ فاضـلاب در شـهر فرمهین با اسـتفاده از تصـمیم‌گیری چند شاخصه. *تصمیم‌گیری و تحقیق در عملیات*. دوره ششم. شماره ویژه. صص ۱-۱۱.
https://doi.org 10.22105/dmor.2021.272429.1508

حبیب زاده، محمد صـادق؛ سرکارگر اردکانی، علی؛ المدرسی، سید علی؛ ۱۳۹۲. *بررسی فرونشست زمین در شهریار با اسـتفاده از تکنیک D-SAR* استاد راهنما استاد سید علی المدرسی. پایان نامه عمران و محیطزیست. دانشگاه آزاد اسلامی یزد. https://ganj.irandoc.ac.ir/

روسـتایی، شـهرام؛ رضـایی مقدم، محمدحسـین؛ یاراحمدی، جمشید؛ نجف وند، سمیرا؛ ۱٤۰۱. بررسی مناطق مستعد ریسـک فرونشـسـت زمین در اثر افت سطح آب زیرزمینی با استفاده از روش FUZZY-AHP (مطالعه موردی: دشت شبستر-صوفیان). *پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمّی*. انتشار آنلاین از ۱ خرداد ۱٤۰۱.
https://doi.org/10.22034/GMPJ.2022.329254.1334

سـایت سـازمان نقشـه‌برداری کشـور؛ ۱٤۰۰. گزارش جامع بررسی مناطق فرونشست استان آذربایجان‌شرقی بر اساس پردازش‌های راداری و ژئودتیک https://ncc.gov.ir/

شـریفی کیا، محمد؛ ۱۳۹۱. تعیین میزان و دامنه فرونشـسـت زمین به کمک روش تداخل‌سـنج راداری در دشت نوق-بهرامان. *مجله برنامه‌ریزی و آمایش فضا*. دوره شانزده. شماره ۳. صص ۷۳-۵۵.
http://hsmsp.modares.ac.ir/article-٥٠٧٦-٢١fa.html

شـریفی کیا، محمد؛ افضـلی، عباسـعلی؛ شایان، سیاوش؛ ۱۳۹٤. استخراج و ارزیابی اثرات پدیده‌های ژئومورفولوژیک ناشی از فرونشست در دشت دامغان. *پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمّی*. دوره چهارم. شماره ۲. صص ٦۰-۷٤.
20.1001.1.22519424.1394.4.2.5.0

شـفیعی، نجمه؛ مختاری، لیلاگلی؛ امیر احمدی، ابوالقاسـم؛ زندی، رحمان؛ ۱۳۹۹. بررسـی فرونشـسـت آبخوان دشت نورآباد با اسـتفاده از روش تداخل سـنجی راداری. *پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمّی*. دوره هشتم. شماره ٤. صص ۹۳-۱۱۱. https://doi.org/10.22034/GMPJ.2020.106424

شـیرانی، کورش؛ پسـندی، مهرداد؛ ابراهیمی، بابک؛ ۱٤۰۰. بررسـی فرونشـسـت زمین در دشـت نجف‌آباد اصفهان با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی تفاضلی راداری. *مجله علوم آب‌وخاک*. جلد بیست و پنجم. شماره ۱. صص ۱۲۷-۱۰۵. https://doi.org/10.47176/jwss.25.1.147214

صـدری‌کیا، منصـوره؛ ۱٤۰۱. پایش فرونشـسـت زمین با تحلیل سری زمانی پراکنش‌گرهای دائمی و تغییرات تراز آب زیرزمینی؛ (مطالعه موردی دشت سراب). *تحقیقات منابع آب ایران*. دوره هیجده. شماره ۲. صص ۱۸-۱.
20.1001.1.17352347.1401.18.2.1.1

فرزین کیا، ربابه؛ امیراحمدی، ابوالقاسـم؛ زنگنه اسـدی، محمدعلی؛ زندی، رحمان؛ ۱٤۰۰. پهنه‌بندی خطر فرونشـست زمین در دشـت جوین با اسـتفاده از مدل تحلیل شبکه‌ای_ فازی. *فضای جغرافیایی*. جلد بیست و یکم. شماره۷٤. صص ۷۱-۵۱.
http://geographical-space.iau-ahar.ac.ir/article-1-3420-fa.html

قربـانی، خلیـل؛ سـاالاری‌جزی، میثم؛ فرنیا، الناز؛ ۱۳۹۷. ارزیابی روش کریجینگ بیزین تجربی در پهنه‌بندی تراز آب زیرزمینی. *مجله پژوهش‌های حفاظت آب‌وخاک*. دوره بیست‌وپنج. شماره ۱. صص ۱۸۲-۱٦۵.
https://doi.org/ 10.22069/JWSC.2018.13571.2826

کماسـی، مهدی؛ گودرزی، حسـام؛ بهنیا، امین؛ ۱۳۹٦. بررسـی روند نوسـانات مکانی-زمانی سـطح ایسـتابی آب‌های زیرزمینی به روش ماشـین بردارپشـتیبان (SVM) و کریجینگ (kriging) مطالعه موردی دشـت سـیلاخور. *پژوهش‌های حفاظت آب‌وخاک*. دوره بیست‌وچهار. شماره ٤. صص ۲۰۹-۱۹۵.
https://doi.org/10.22069/JWSC.2017.11640.2611

کیانی، فاطمه؛ عابدینی، موسـی؛ احمدزاده، غلامرضـا؛ ۱۳۹۷. بررسـی ارتباط فرونشـسـت زمین و افت سطح آب‌های زیرزمینی در شهرستان کرج با استفاده از روش تلفیق وزنی در محیط GIS. کنفرانس عمران، معماری و شهرسازی کشورهای جهان اسلام. تبریز. صص ۸-۱.
https://civilica.com/doc/775262

منتظریون، مریم؛ اصـلانی، فرشـته؛ ۱۳۹۸. ارزیابی خطر فرونشـسـت با به‌کارگیری سیستم اطلاعات جغرافیایی در پهنه استان‌های تهران و البرز. *فصلنامه دانش پیشگیری و مدیریت بحران*. دوره نهم. شماره ۱. صص ۱۳-۱.
20.1001.1.23225955.1398.9.1.3.2

ناموری، محمد؛ صـدری کیا، منصـوره؛ ۱۳۹۹. پایش فرونشست دشت سراب با استفاده از تحلیل سری زمانی مبتنی بر تداخل‌سـنجی راداری. اولین کنفرانس بین المللی و دومین کنفرانس ملی فناوری‌ها و کاربردهای نوین. صـص ۱- ۱٤.
https://civilica.com/doc/1249670

Abidin HZ, Andreas H, Gumilar I, & Brinkman JJ., 2015. On correlation between urban development, land subsidence and flooding phenomena in Jakarta, Changes in Flood Risk and Perception in Catchments and Cities (HS01 – IUGG2015). Published by Copernicus Publications on behalf of the International Association of Hydrological Sciences. https://doi.org/10.5194/piahs-370-15-2015

Aher P, Adinarayana J, & Gorantiwar SD., 2013. Prioritization of watersheds using multi-criteria evaluation through the fuzzy analytical hierarchy process. Agric Eng Int CIGR J, 15(1):11–18. http://www.cigrjournal.org

Alinezhad A, & Khalili J., 2019. New Methods and Applications in Multiple Attribute Decision Making (MADM). International Series in Operations Research & Management Science, vol 277, Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-15009-9

Arab Ameri A, Pourghasemi HR, & Cerda A., 2018. Erodibility prioritization of sub-watersheds using morphometric parameters analysis and its mapping: A comparison among TOPSIS,

VIKOR, SAW, and CF multi-criteria decision making models, Science of The Total Environment, 613-614:1385 1400.· https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.210

Bou kheir R, Cerdan O, & Abdellah, C., 2006. Regional soil erosion risk mapping in Lebanon, Geomorphology, 82: 347-359. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.05.012

Gambolati G, Massimillano F, & Teatro F., 2018. Anthropogenic Land Subsidence, GROUNDWATER: 2444-2457. https://doi.org/10.1002/0470848944.hsa164b

Garg S, Motagh M, Jayaluxmi I, Karanam V, Selvakumaran S, & Marinoni A., 2022. Assessment of Land Subsidence Hazard, Vulnerability and Risk: A case study for National Capital Region in India, EGU General Assembly 2022 (Vienna, Austria, Online 2022). https:// doi.org/ 10.5194/ egusphere-egu22-12646

Georgiou D, Mohammed E S, & Rozakis S., 2015. Multi-criteria decisionmaking on the energy supply configuration of autonomous desalination units. Renew. Energy 75: 459–467. https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.09.036

Hoseini Y., 2019. Use fuzzy interface systems to optimize land suitability evaluation for surface and trickle irrigation, Information Processing in Agriculture, 6 (1): 11-19. https:// doi.org/ 10.1016/j.inpa.2018.09.003

Huang G, Fan H, Lu L, & Yu W., 2020. Land Subsidence Monitoring in Dezhou City Based on Sbas-Insar Technology the International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLIII-B3: 1-6. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B3-2020-299-2020

Mathew M, & Sahu S., 2018. Comparison of new multi-criteria decision making methods for material handling equipment selection, Management Science Letters, Vol 8: 139–150. https://doi.org/10.5267/j.msl.2018.1.004

Minh DHT, Tran QC, Pham QN, Dang T, Nguyen DA, & El-Moussaw A., 2019. Measuring Ground Subsidence in Ha Noi Through the Radar Interferometry Technique Using TerraSAR-X and Cosmos SkyMed Data, in IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, vol. 12, No. 10: 3874-3884. https:// doi.org/ 10.1109/ JSTARS. 2019.2937398

Ranjgar B, Razavi V, Foroughnia T, Sadeghi-Niarak A, & Perissin D., 2021. Land Subsidence Susceptibility Mapping Using Persistent Scatterer SAR Interferometry Technique and Optimized Hybrid Machine Learning Algorithms, Remote Sensing, VOL 13, No 7: 1326. https://doi.org/10.3390/rs13071326